

*На правах рукописи*

**Соловьев Денис Алексеевич**

**Система расчетно-экспериментальной диагностики состояния  
активной зоны ECRAN 3D**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автор:



**Москва 2012**

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «Московский инженерно-физический институт»

**Научный руководитель** кандидат физико-математических наук  
**Семенов Андрей Артемьевич,**  
НИЯУ МИФИ

**Официальные оппоненты** доктор физико-математических наук  
**Загребаев Андрей Маркоянович**  
НИЯУ МИФИ

кандидат технических наук  
**Алексаков Александр Николаевич**  
ОАО "НИКИЭТ"

**Ведущая организация** **Открытое Акционерное Общество**  
**"Всероссийский Научно-**  
**исследовательский институт**  
**по эксплуатации**  
**атомных электростанций"**  
**(ОАО "ВНИИАЭС")**

Защита состоится 16 января 2013 года в 15 час 00 мин.  
на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 НИЯУ МИФИ  
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31, тел: 323-91-67.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан 14 декабря 2012 года.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв  
в одном экземпляре, заверенном печатью организации,  
по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,

д.ф.-м.н., профессор



И.И. Чернов

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Диссертация посвящена разработке системы диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной базы данных ядерного реактора. Своевременное обнаружение технических неисправностей, отказов оборудования и ошибок в системе информационного обеспечения необходимо для обеспечения безопасности, надежности и эффективности эксплуатации АЭС и ядерной энергетики в целом. Постоянное совершенствование оборудования АЭС требует постоянного проведения работ по его охвату диагностическими системами, что делает тему данной диссертации **актуальной**.

## Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы явилась разработка качественно нового функционального элемента информационной поддержки действующих ЯЭУ – системы непрерывной расчетно - экспериментальной диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной базы данных реакторной установки.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработаны новые алгоритмы системы расчетно - экспериментальной диагностики оборудования и системы математического обеспечения состояния активной зоны;
- достигнут качественно новый уровень диагностики за счет перехода к трехмерным моделям нейтронно-теплогидравлических процессов;
- программно реализована система расчетно-экспериментальной диагностики **ЕСРАН 3D**;
- созданное программное средство внедрено на объектах атомной промышленности: Курской АЭС, Смоленской АЭС;
- проведена расчетно-экспериментальная верификация и выработаны рекомендации по эффективному использованию созданной системы в реальных условиях эксплуатации реакторной установки.

## Научная новизна работы

- Впервые разработаны алгоритмы диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной базы данных реакторной установки, использующие трехмерные нейтронно - теплогидравлические модели для повышения чувствительности.
- Реализован новый подход к идентификации нарушений на основе трехмерных шаблонов отказов.
- Разработаны новые подходы к повышению скорости работы диагностических алгоритмов, основанные на пространственной локализации возмущения при возникновении отказа.
- Получены новые результаты тестирования разработанной системы в условиях действующих энергоблоков с РБМК-1000.

## Практическая ценность работы

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- создана расчетно-измерительная система **ЕСРАН 3D**, предназначенная для непрерывной диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной базы данных реакторов РБМК-1000;
- обеспечен требуемый уровень функционально - технических показателей системы диагностики (набор диагностических параметров и точностных характеристик) с точки зрения эксплуатации ЯЭУ;
- проведена расчетно-экспериментальная верификация и валидация созданного программного средства;
- система **ЕСРАН 3D** введена в опытную эксплуатацию на действующих объектах атомной промышленности: Курской АЭС и Смоленской АЭС.

## Результаты, полученные лично автором

- Разработаны новые версии алгоритмов системы расчетно - экспериментальной диагностики состояния активной зоны на основе трехмерных моделей нейтронно-теплогидравлических процессов.
- Проведен анализ эффективности использования улучшенных алгоритмов.
- Разработана и реализована система **ESCRAN 3D**.
- Выработаны рекомендации по дальнейшему развитию и практическому использованию разработанной системы диагностики.

## Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена использованием в основных блоках системы диагностики **ESCRAN 3D** проверенных на практике математических моделей (нейтронно-физических и теплогидравлических процессов, датчиков внутриреакторного контроля и органов СУЗ), положенных в основу программ поддержки и сопровождения эксплуатации:

- программа POLARIS, версия 4.2.1 (паспорт аттестации ПС № 231 от 18.09.2007);
- программа ТРОЙКА, версия 7.1 (паспорт аттестации ПС № 228 от 18.09.2007);
- библиотека нейтронно-физических констант БОКР-РБМК комплекса программ ЭНЕРГИЯ (паспорт аттестации ПС № 231 от 18.09.2007);
- программа ПРИЗМА-М-АНАЛОГ, версия 1.6.1 (паспорт аттестации ПС № 214 от 01.03.2006);
- программа ПРИЗМА-М (регистрационный номер №244, дата выдачи 23.09.2008).

## Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных семинарах, конференциях и совещаниях:

- Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2010, 2011, 2012;
- 22-ой и 23-ий отраслевой семинар «Нейтронно - физические проблемы атомной энергетики (Нейтроника-2011, 2012)»;
- Совещание в ОАО «Концерн Росэнергоатом»- 2012;
- Семинар в инженерном центре 360 ОАО «ВНИИАЭС»- 2012;
- Школа-семинар по проблемам физики реакторов «Волга-2012».

## Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 работ, включая 3 статьи в реферируемых журналах из списка ВАК РФ.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Новые версии алгоритмов системы расчетно - экспериментальной диагностики состояния активной зоны на основе трехмерных моделей нейтронно-теплогидравлических процессов и трехмерных шаблонов отказов.
2. Система **ESCRAN 3D** непрерывной диагностики состояния активной зоны РБМК-1000.
3. Результаты верификации системы **ESCRAN 3D**.

## Структура и объем работы

Диссертация состоит из списка иллюстраций, списка таблиц, обозначений и сокращений, общей характеристики работы, введения, 3 глав, заключения, 2 приложений и списка литературы, включающего 111 источников. Общий объем работы составляет 91 страницу, содержит 23 рисунка и 1 таблицу.

# Основное содержание работы

В настоящее время достигнут значительный прогресс в понимании физических основ поведения ядерных реакторов. Разработаны программы, позволяющие детально описывать отдельные процессы, происходящие в реакторной установке (РУ). Однако даже такого мощного инструментария не всегда бывает достаточно для быстрого и эффективного решения задач, возникающих при эксплуатации АЭС. Одной из таких задач является задача непрерывного мониторинга и диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной базы данных реакторной установки.

Для активных зон АЭС с РБМК-1000 к 2000 году была разработана методика расчетно-экспериментальной диагностики. Основываясь на этой методике была реализована программа ECRAN (Experimental & Calculational Reactor ANalysis), предназначенная для непрерывного контроля измерительных данных, поступающих от системы внутриреакторного контроля, и своевременного выявления отказов оборудования, а так же ошибок в исходных данных программ сопровождения эксплуатации ЯЭУ.

Однако, как это часто бывает, если программа не является достоянием сообщества специалистов, которое непрерывно бы поддерживало и совершенствовало ее работоспособность, то программа устаревает и через какое-то время становится неработоспособной. К сожалению, такая судьба постигла и программу ECRAN.

Тем не менее, реализованная в программе методология диагностики и алгоритмы не были утеряны, а возможность живого контакта с авторами и разработчиками позволила восстановить и развить заложенный в методику научный потенциал. Использование современных кодов, методов и подходов к разработке программного обеспечения сделало программу диагностики работоспособной под современными операционными системами на современной компьютерной технике.

В процессе выполнения диссертационной работы была создана расчетно-измерительная диагностическая система **ECRAN 3D**. Ее алгоритмы основаны на предположении, что все практически значимые неисправности и нарушения могут быть зарегистрированы путем выявления несоответствия между измеренными данными системы внутриреакторного контроля и расчетными данными, полученными с использованием программных средств,

описывающих поведение установки.

Большинство ошибок и неисправностей, возникающих в ходе эксплуатации реактора, оперативно выявляются персоналом АЭС без использования дополнительных средств диагностики, поскольку они фиксируются с помощью штатной системы контроля РУ. Своевременное обнаружение других неисправностей штатными средствами оказывается невозможным, поскольку штатные средства ориентированы на проведение диагностики, основанной только на данных о текущем состоянии, и, вследствие требований независимости подсистем, не используют комплексные математические модели установки.

Характерными примерами таких ошибок и неисправностей для РБМК являются:

- ошибочное значение типа загружаемой ТВС;
- недостоверное значение энерговыработки ТВС;
- неверное показание положения стержня СУЗ;
- неверное показание или выход из строя внутрореакторного датчика (ВРД);
- частичный или полный выход из строя расходомера;
- неверная регистрация положения запорно-регулирующего клапана (ЗРК);
- потеря целостности гильзы кластерного регулирующего органа (КРО).

Все перечисленные выше ошибки и отказы можно трактовать как возмущения параметров математической модели реакторной установки, порождающие наблюдаемый сигнал рассогласования – расхождение между расчетными и измеренными данными. Из физических соображений понятно, что каждый тип возмущения порождает характерную "пространственно-временную" форму сигнала рассогласования. Предлагаемая система диагностики **ЕСРАН 3D** основана на математически корректной процедуре обработки этого сигнала и позволяет решить следующие важные с точки зрения безопасности, надежности и экономичности задачи:



- регистрация факта и времени возникновения возмущения;
- локализация возмущения (определение номера канала, координаты по высоте активной зоны);
- определение типа возмущения.

Для обеспечения требуемого уровня точности, оперативности и надежности в системе диагностики применяются штатные программы поддержки и сопровождения эксплуатации РБМК-1000, входящие в состав комплекса ЭНЕРГИЯ (POLARIS, ТРОЙКА) и разработанные в центре 360 ОАО "ВНИИАЭС".

Разработанная система **ЕСРАН 3D** применима при работе реактора РБМК-1000 в энергетическом режиме на стационарном уровне мощности.

## Описание алгоритма

Алгоритм системы диагностики **ЕСРАН 3D** работает в циклическом режиме и состоит из нескольких блоков, которые выполняются в следующей последовательности (рис. 1).

**Прием данных** осуществляется в начале каждого цикла работы алгоритма диагностики. Для этого производится автоматическая обработка базы данных ИИС СКАЛА-МИКРО. Данные принимаются в объеме, необходимом для проведения расчетов по программам комплекса ЭНЕРГИЯ (рис. 2).

**Предварительная проверка** проводится для отсеечения случаев попадания в систему диагностики ложных данных, которые не связаны с реальными отказами реакторного оборудования, а возникают непосредственно в самой информационно-вычислительной среде по разным (случайным или характерным для этой системы) причинам. Предварительное тестирование данных проводится в виде сравнения результатов расчетов по программам ПРИЗМА-М и ПРИЗМА-М-АНАЛОГ (рис. 3).

Важной особенностью для АЭС с энергоблоками типа РБМК является возможность проведения операции перегрузки технологических каналов без остановки реактора. Однако в настоящее время в базе данных о состоянии энергоблока информации о промежуточном положении ТВС в активной зоне нет, поэтому из-за невозможности проведения корректного нейтронно-

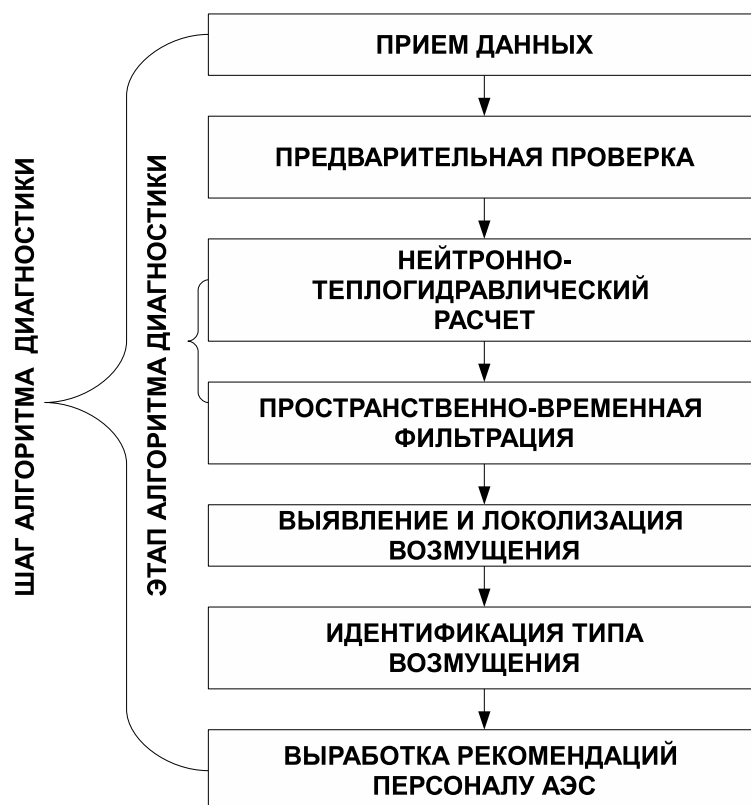


Рис. 1. Блок-схема алгоритма системы диагностики ECRAN 3D

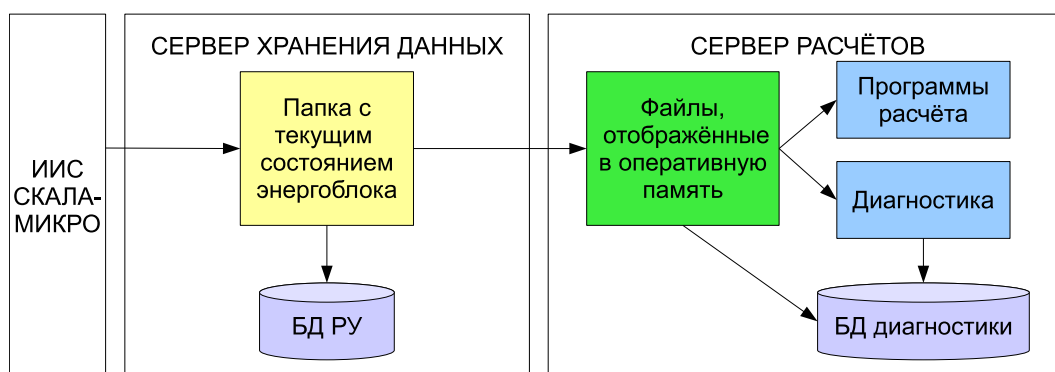


Рис. 2. Блок-схема потоков данных системы диагностики ECRAN 3D

физического расчета в алгоритме диагностики предусмотрена пауза в работе на время перегрузки.

**Нейтронно-физический расчет** проводится с использованием аттестованных штатных программ поддержки и сопровождения эксплуатации РБМК-1000 (POLARIS, ТРОЙКА). Для того, чтобы эти программы могли быть использованы для целей диагностики, в их код были внесены сервисные дополнения, позволяющие осуществлять выгрузку необходимых для диагностики функционалов: измеренные, расчетные и восстановленные значения мощностей в местах расположения ВРД, поправки к сечениям генерации

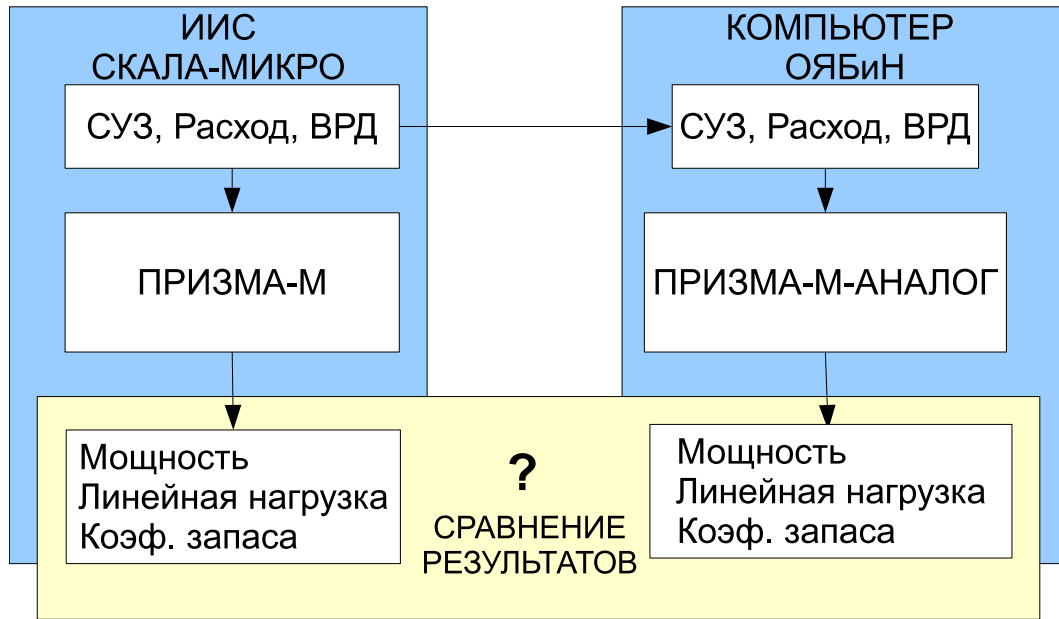


Рис. 3. Блок-схема алгоритма предварительной проверки данных

( $\delta_{\Sigma}(r)$  – поправочный коэффициент к источнику нейтронов, обеспечивающий согласие расчетной модели с показаниями радиальных и высотных датчиков контроля энерговыделения, выбранный таким образом, что для скорректированной расчетной модели коэффициент размножения равен единице):

$$\begin{aligned}
 (-\nabla D_1 \nabla + \Sigma_{a1} + \Sigma_{12}) \cdot \varphi_1 &= \delta_{\Sigma}(r) \cdot (\nu \Sigma_{f2} \cdot \varphi_2 + \nu \Sigma_{f1} \cdot \varphi_1), \\
 (-\nabla D_2 \nabla + \Sigma_{a2}) \cdot \varphi_2 &= \Sigma_{12} \cdot \varphi_1, \\
 \int_{az} (\nu \Sigma_{f2} \cdot \varphi_2 + \nu \Sigma_{f1} \cdot \varphi_1) \cdot dr &= Q.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Все обозначения в формулах 1 являются общепринятыми.

Использование  $\delta_{\Sigma}(r)$  связано с тем, что для физически больших реакторов, каким является РБМК, характерна высокая чувствительность распределения энерговыделения к неопределенности в нейтронно-физических сечениях и исходных данных для расчетной модели (например, положения стержней СУЗ и энерговыработки ТВС). Кроме того, в штатной системе контроля РБМК-1000 отсутствует трехмерный контроль поканальных энерговыработок, поэтому для повышения точности расчета производится или корректировка нейтронно-физических сечений, или корректировка трехмерных энерговыработок с учетом показаний дискретно расположенных внутриреакторных датчиков.

**Особенности восстановления для целей диагностики.** Восстановление трехмерного поля энерговыделения по программе POLARIS осу-

ществляется посредством аппроксимации сигналов ВРД результатами физ-расчета.

По сравнению с обычной процедурой восстановления по POLARIS, в диагностическом режиме расчета квантили отбраковки сигналов ВРД по завышению и занижению сильно увеличены. В результате датчики с сильными отклонениями не бракуются, а используется в процедуре восстановления, что позволяет в дальнейшем получить информацию о возмущении.

Затем проводится итерационная процедура, целью которой является перестройка поля в местах без ВРД. При этом должно быть выполнено условие критичности. В качестве параметра настройки в данном случае выступают поправки к сечениям генерации.

Перед проведением фильтрации формируется сигнал рассогласования. Сигнал рассогласования  $\vec{\delta}$  содержит следующие массивы данных:

$$\vec{\delta} = \begin{pmatrix} \vec{\delta}_r \\ \vec{\delta}_h \\ \vec{\delta}_\Sigma \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\vec{\delta}_r = \vec{W}_{Rizm} - \vec{W}_{Rrasch}, \quad (3)$$

$$\vec{\delta}_h = \vec{W}_{Hizm} - \vec{W}_{Hrasch}, \quad (4)$$

где  $\vec{\delta}$  – сигнал рассогласования,  $\vec{W}_{Rizm}$  – измеренные мощности в местах расположения ВРД-Р;  $\vec{W}_{Rrasch}$  – мощности ВРД-Р, полученные после восстановления;  $\vec{W}_{Hizm}$  – измеренные мощности в местах расположения ВРД-В;  $\vec{W}_{Hrasch}$  – мощности ВРД-В, полученные после восстановления;  $\vec{\delta}_\Sigma$  – поправки к сечениям генерации.

Системой диагностики одновременно анализируется нескольких компонент сигнала рассогласования:  $\vec{\delta}_r, \vec{\delta}_h, \vec{\delta}_\Sigma$ . В результате, в случае наличия возмущения неизвестной природы, оно оказывается "зажато в клещи" между  $\vec{\delta}_r, \vec{\delta}_h$  и  $\vec{\delta}_\Sigma$ , т.е. будет выявлено в какой-то одной или нескольких компонентах сигнала рассогласования.

**Пространственно-временная фильтрация** осуществляется после проведения нейтронно-физического расчета. Сначала производится пространственная фильтрация. Для этой цели формируется вышеописанный сигнал рассогласования  $\vec{\delta}$ , позволяющий в случае наличия, выделить возмущение в пространстве.

Затем проводится временная фильтрация, предназначенная для снижения уровня шумов в компонентах сигнала рассогласования.

Для проведения временной фильтрации, полученные сигналы рассогласования для каждого момента времени вводятся в две последовательные очереди равной длины:  $A$ ,  $B$  (рис. 4).

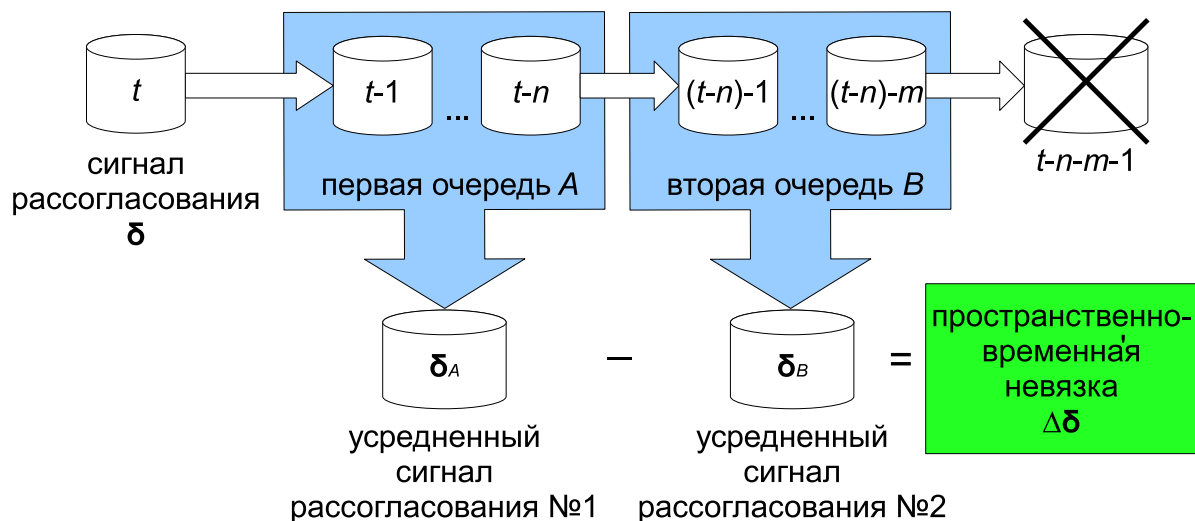


Рис. 4. Блок-схема алгоритма пространственно-временной фильтрации

Сначала осуществляется ввод в очередь  $A$ . По мере поступления все новых данных сигнал рассогласования движется к концу первой очереди  $A$  и по достижении конца переводится во вторую очередь  $B$ . При устаревании данных во второй очереди  $B$  они исключаются из области фильтрации. При каждом поступлении новых данных производится усреднение сигналов рассогласования, находящихся в очередях. Для этого каждая очередь обрабатывается усредняющим цифровым фильтром, предназначенным для обработки сигнала с целью повышения отношения полезного сигнала к шуму. Выходом усредняющего фильтра является среднее арифметическое значение поданного на вход набора данных.

Результатом усреднения являются созданные на основе временных очередей два усредненных сигнала рассогласования:  $\vec{\delta}_A, \vec{\delta}_B$ . После усреднения производится покомпонентное вычитание второго усредненного сигнала из первого:

$$\Delta\vec{\delta} = \vec{\delta}_A - \vec{\delta}_B. \quad (5)$$

Таким образом, на выходе получается разница усредненных сигналов рассогласований, называемая пространственно-временной невязкой  $\Delta\vec{\delta}$  и характеризующая пространственно-временные изменения в состоянии РУ.

Исходя из того, что методика диагностики ориентирована на оперативный режим работы с периодичностью проведения диагностики состояния реактора не более 2 часов, размер каждой временной очереди выбран равным 30 минутам.

Пример обработки сигнала датчика по рассмотренному алгоритму фильтрации представлен на (рис. 5).

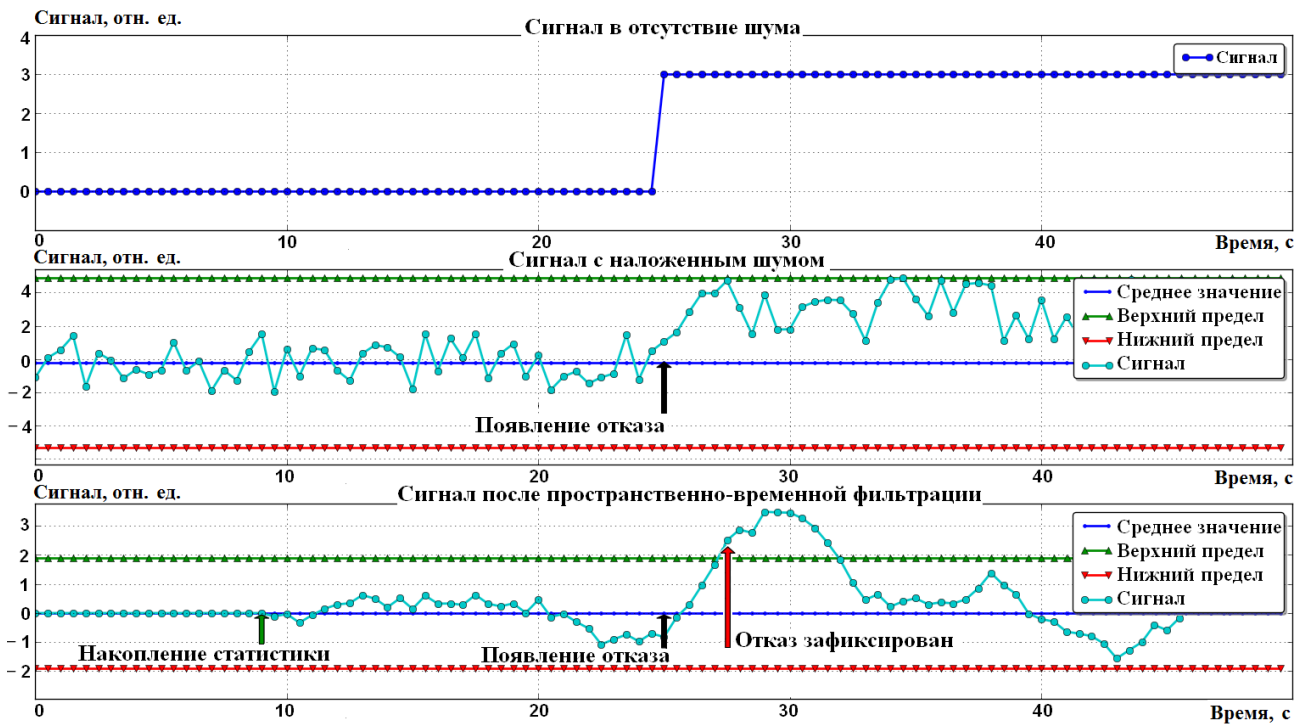


Рис. 5. Пример обработки сигнала по алгоритму фильтрации

**Выявление и локализация возмущения.** Как было показано в работе А.А. Семенова "Развитие методов нелинейной идентификации и мониторинга активных зон ядерных реакторов" оптимальная линейная оценка величины отказа получается по формуле:

$$c_i = (\Delta\vec{\delta}, \Delta\vec{\delta}_{template,i}), \quad (6)$$

где  $c_i$  – линейная оценка величины отказа с минимальной дисперсией,  $\Delta\vec{\delta}$  – пространственно-временная невязка,  $\Delta\vec{\delta}_{template,i}$  – оптимальный шаблон для отказа типа  $i$ .

Шаблон отказа – характерный образец пространственно-временной невязки. Шаблон отказа получается путем вычитания невозмущенного сиг-

нала рассогласования из возмущенного:

$$\Delta \vec{\delta}_{template} = \frac{\vec{\delta}_{vozm} - \vec{\delta}_{nevozm}}{\|\vec{\delta}_{vozm} - \vec{\delta}_{nevozm}\|}. \quad (7)$$

Следовательно, для работы алгоритмов фильтрации требуется набор шаблонов отказов. И хотя методы фильтрации с использованием шаблонов отказов для трехмерных полей практически не отличаются от методов, применяемых для двумерных полей, однако с точки зрения программной реализации разница существенна. В двумерном случае количество мест возникновения отказа ограничено количеством устройств, которые могут отказать. При этом предполагается, что форма двумерного поля энерговыделения мало меняется при изменении амплитуды отказа. В трехмерном случае форма поля энерговыделения сильно меняется при изменении амплитуды отказа, поэтому резко растёт количество шаблонов, с которыми надо сравнивать отклонения полей. При этом надо учитывать, что шаблон при изменении положения органа регулирования (ОР) СУЗ в этом случае зависит от двух параметров: исходного и конечного положения поглощающего элемента СУЗ. Кроме того, на порядок растёт размерность векторов, над которыми производятся операции, что связано с увеличением количества слоев по высоте. Это приводит к усложнению задачи примерно в 100–1000 раз. В результате возникает задача о разработке и реализации новых методов, которых не было в двумерной версии системы ECRAN, позволяющих минимизировать число применяемых шаблонов без существенной потери точности диагностирования. Поэтому в работе предлагаются упрощенные, но быстродействующие алгоритмы оценки величины отказа, которые далее называются алгоритмами локализации отказов.

Перед тем как начать поиск отказа производится свертка объемного поля поправок к сечениям генерации  $\delta_{\Sigma}(x, y, z)$  с высотной форм-функцией  $f(z)$ . Результатом такой свертки является плоское поле поправок  $\delta_{\Sigma}(x, y)$ , полученное путем суммирования поправок по высоте в каждом топливном канале:

$$\delta_{\Sigma}(x, y) = \int_0^H \delta_{\Sigma}(x, y, z) \cdot f(z) dz. \quad (8)$$

Для повышения избирательности при локализации возмущений различного типа: положение ОР СУЗ, энерговыработка, и др., можно использо-

вать высотные форм-функции различного вида. Примеры высотных форм-функций для различных типов отказов представлены на (рис. 6).

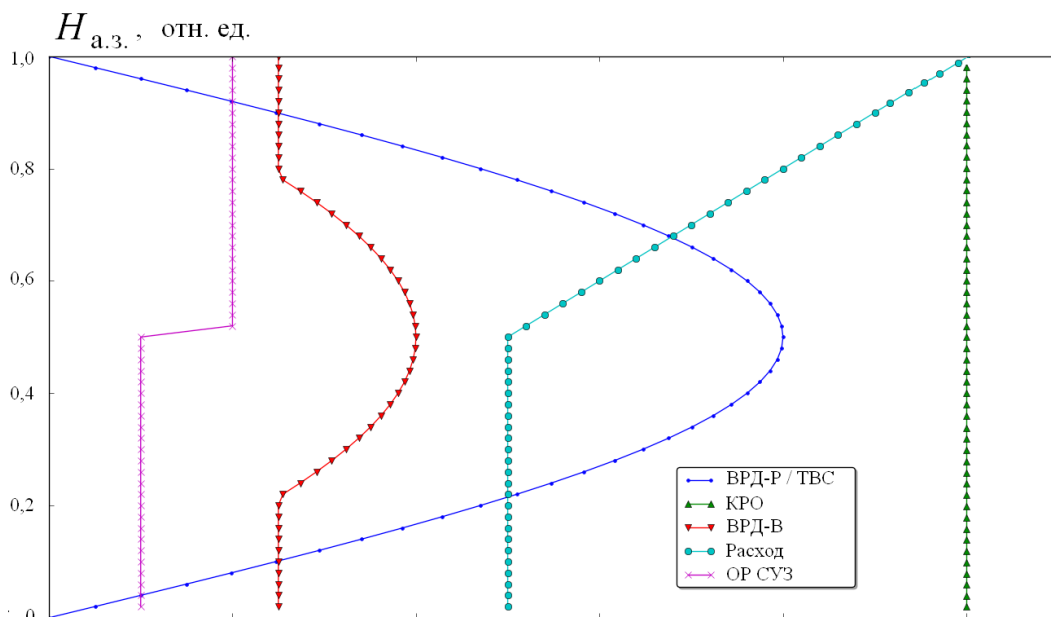


Рис. 6. Примеры высотных форм-функций для разных типов возмущений (для лучшего представления форм-функции смещены по горизонтальной оси)

После свертки с высотной форм-функцией, производится анализ компонент пространственно-временной невязки  $\Delta\vec{\delta}^k$ , где  $k = 1, \dots, n$ ,  $n$  – количество элементов в ВРД-Р, ВРД-В и в свернутых поправках к сечениям генерации. Для этого за каждой  $\Delta\vec{\delta}^k$  производится постоянное наблюдение, в ходе которого  $\Delta\vec{\delta}^k$  сравнивается со своими индивидуальными порогами чувствительности.

Если обнаружен факт превышения порога чувствительности, то производится локализация места возмущения. С этой целью в плоском поле поправок к сечениям генерации  $\delta_{\Sigma}(x, y)$  выделяется место с максимальным по величине отклонением от среднего значения:

$$(x_0, y_0) = \operatorname{argmax}[(\bar{\delta}_{\Sigma}(x, y) - \delta_{\Sigma}(x, y))^2]. \quad (9)$$

После этого в активной зоне выделяется квадратная полячейка размером  $9 \times 9$  каналов с центром, расположенным в месте максимального возмущения  $(x_0, y_0)$ . Для каналов, образующих полячейку, проводится идентификация типа возмущения.



**Идентификация возмущения** производится в случае, если обнаружено заметное возмущение свойств активной зоны и это возмущение локализовано. Для этого пространственно-временная невязка  $\Delta\vec{\delta}$  сравнивается с набором шаблонов отказов. Процедура сравнения основана на скалярном перемножении двух векторов – невязки и шаблона; при этом получается число  $c_{i,j}$ , отражающее величину совпадения состояния РУ с шаблоном отказа:

$$c_{i,j} = (\Delta\vec{\delta}, \Delta\vec{\delta}_{template,i,j}). \quad (10)$$

Далее, среди всех  $c_{i,j}$  выбирается максимальное значение:

$$c_{max} = \max[|c_{i,j}|]. \quad (11)$$

Таким образом, сопоставляя  $c_{max}$  и  $\Delta\vec{\delta}_{template,i,j}$ , определяем место возмущения и его тип.

**Снижение уровня шума.** Для устранения из пространственно-временной невязки характерных компонент шума был использован подход на основе базиса главных компонент (БГК).

Что такое БГК рассмотрим на примере задачи о нахождении в некотором банаховом пространстве наилучшего базиса для аппроксимации заданного набора векторов этого банахова пространства. По построению этот базис обладает свойством:

$$\sum_{l=1}^N \|\vec{x}_l - \sum_{k=1}^M \alpha_{l,k} \vec{y}_k\| \rightarrow \min, \quad (12)$$

$$N > M + 1,$$

$$l = 1, N,$$

$$k = 1, M,$$

где  $\vec{x}_l$  – аппроксимируемый набор векторов,  $\vec{y}_k$  – искомый базис (БГК).

Как можно заметить, этот подход эквивалентен применению метода главных компонент или применению в качестве базиса функций канонического разложения. Метод главных компонент также можно встретить в литературе под названием истинное или собственное ортогональное разложение (Proper Orthogonal Decomposition (POD)).

В нашем случае БГК строился на основе пространственно-временных невязок. Тесты проводились для разных размеров БГК и на разных наборах

входных данных. Во всех случаях БГК строился на данных, которые заведомо не содержали ошибок.

Затем применялся подход на основе БГК, позволяющий в случае наличия возмущения, которое не является характерным для набора данных, на которых строился БГК, дополнительно его выделить. Для этого пространственно-временная невязка проецировалась в БГК, шаблоны отказов также проецировались в БГК.

$$\begin{aligned}\alpha^k &= (\Delta\vec{\delta}, \Delta\vec{\delta}_{B GK}^k), \\ \alpha_{template,i,j}^k &= (\Delta\vec{\delta}_{template,i,j}, \Delta\vec{\delta}_{B GK}^k).\end{aligned}\quad (13)$$

Далее строилась разница между исходными векторами и их проекциями в БГК:

$$\begin{aligned}\Delta\vec{\varepsilon} &= \Delta\vec{\delta} - \sum_{k=1}^M \alpha^k \Delta\vec{\delta}_{B GK}^k, \\ \Delta\vec{\varepsilon}_{template,i,j} &= \Delta\vec{\delta}_{template,i,j} - \sum_{k=1}^M \alpha_{template,i,j}^k \Delta\vec{\delta}_{B GK}^k, \\ k &= 1, M, \\ c_{i,j} &= (\Delta\vec{\varepsilon}, \Delta\vec{\varepsilon}_{template,i,j}).\end{aligned}\quad (14)$$

За величиной  $c_{i,j}$  производилось наблюдение.

Результаты расчетных тестов с использованием подхода на основе БГК показали повышение отношения полезного сигнала к шуму на 5–12%. И хотя в настоящее время в системе диагностики **ESCRAN 3D** данный подход не используется вследствие повышения времени расчета и усложнения расчетной схемы, однако он вполне применим для выделения нехарактерных для объекта наблюдения возмущений. Из результатов этих экспериментов можно сделать дополнительный вывод, что используемые нейтронно-физические модели корректно описывают поведение установки.

**Выбор порога чувствительности.** При разработке средств диагностики обычно приходится идти на компромисс между приемлемым уровнем ошибок первого (ложная тревога) и второго рода (пропуск отказа). Зачастую для принятия решения о наличии нарушения используется пороговое значение, которое может варьироваться с целью сделать тест более строгим или, наоборот, более мягким. Например, повышение чувствительности средства

диагностики приведет к увеличению риска ошибки первого рода, а понижение чувствительности – к увеличению риска ошибки второго рода (пропуск отказа).

Для системы **ECRAN 3D** вопрос о выборе порога чувствительности был решен исходя из оценок стандартного отклонения пространственно-временных невязок, полученных при обработке архивной информации о состояниях энергоблока. При этом была принята нормальная модель распределения шумов измерительной аппаратуры и расчетных данных нейтронно-физических моделей:

$$\overline{\Delta\delta^k} = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \Delta\delta_p^k, \quad (15)$$

$$\sigma^k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{p=1}^N (\overline{\Delta\delta^k} - \Delta\delta_p^k)^2}, \quad (16)$$

$$\Delta\delta^{k,UpLim} = \overline{\Delta\delta^k} + M\sigma^k, \quad (17)$$

$$\Delta\delta^{k,DnLim} = \overline{\Delta\delta^k} - M\sigma^k, \quad (18)$$

где  $k$  – элемент пространственно-временной невязки,  $\overline{\Delta\delta^k}$  – среднеарифметическое значение выборки по элементу  $k$ ,  $\sigma^k$  – стандартное отклонение,  $p$  – элемент выборки,  $N$  – размер выборки,  $M$  – параметр настройки порога чувствительности системы.

## Результаты расчетных исследований

В рамках работ по теме "Топливоиспользование, новые виды ядерного топлива, ОР СУЗ. Разработка методики и программного обеспечения оперативной диагностики целостности гильз КРО по локальному изменению мощностей топливных каналов в районе расположения КРО" в центре 360 ОАО "ВНИИАЭС" и ОАО "НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала" было принято решение разработать и программно реализовать методику оперативной диагностики залива гильзы КРО с использованием программных средств сопровождения эксплуатации.

В ОАО "НИКИЭТ имени Н.А. Доллежала" на базе программного комплекса SADCO был создан программный модуль "Диагностика СУЗ".

В центре 360 ОАО "ВНИИАЭС" было принято решение использовать для диагностики КРО программы комплекса ЭНЕРГИЯ и алгоритм системы **ЕСРАН 3D**. В связи с этим перечень отказов, диагностируемых системой **ЕСРАН 3D**, был расширен на случай залива водой гильзы КРО.

**Примеры поиска залива гильз КРО.** Поскольку точностные характеристики диагностической системы должны быть обоснованы расчетными исследованиями, был проведен анализ данных по эксплуатации КРО и информации по нарушениям в работе АЭС, связанным с заливом водой гильз КРО на Курской и Смоленской АЭС.

Для наглядного представления информации, получаемой в процессе анализа архивов эксплуатационных данных АЭС по системе **ЕСРАН 3D**, используются величины совпадения пространственно-временной невязки с шаблонами отказа типа залив гильзы КРО:

$$c_{KRO,j} = (\Delta\vec{\delta}, \Delta\vec{\delta}_{template,KRO,j}). \quad (19)$$

Результаты тестирования представлены ниже.

#### **Диагностика состояний 1-го энергоблока Смоленской АЭС.**

Был проведен поиск нарушения, связанного с заливом КРО 4615, для 1 энергоблока Смоленской АЭС. Нарушение было зафиксировано 10.06.2010. В момент времени 22:21 10.06.2010 на (рис. 7) видно начало фиксации возмущения, связанного с заполнением гильзы КРО водой. В момент времени 23:50 10.06.2010 происходит выход за границы допустимого коридора безотказной работы, свидетельствующий о наличии отказа типа: вода в гильзе КРО 4615.

Для каждого энергоблока порог чувствительности к отказу определяется индивидуально, исходя из характеристик используемой измерительной аппаратуры. При снижении порога чувствительности не только уменьшается время обнаружения отказа, но и может происходить регистрация отказа для соседних КРО. Однако канал с реальным отказом имеет большую интенсивность по сравнению с остальными, поэтому дополнительная регистрация не является недостатком алгоритма, а лишь свидетельствует о том, что район вблизи КРО 4615 заслуживает повышенного внимания.

**Диагностика состояний 4-го энергоблока Курской АЭС.** Был проведен поиск нарушения, связанного с заливом КРО 3245, для 4 энергоблока Курской АЭС. Нарушение, связанное с появлением воды в гильзе КРО, было зафиксировано между 14.12.2010 – 15.12.2010. Однако точного времени

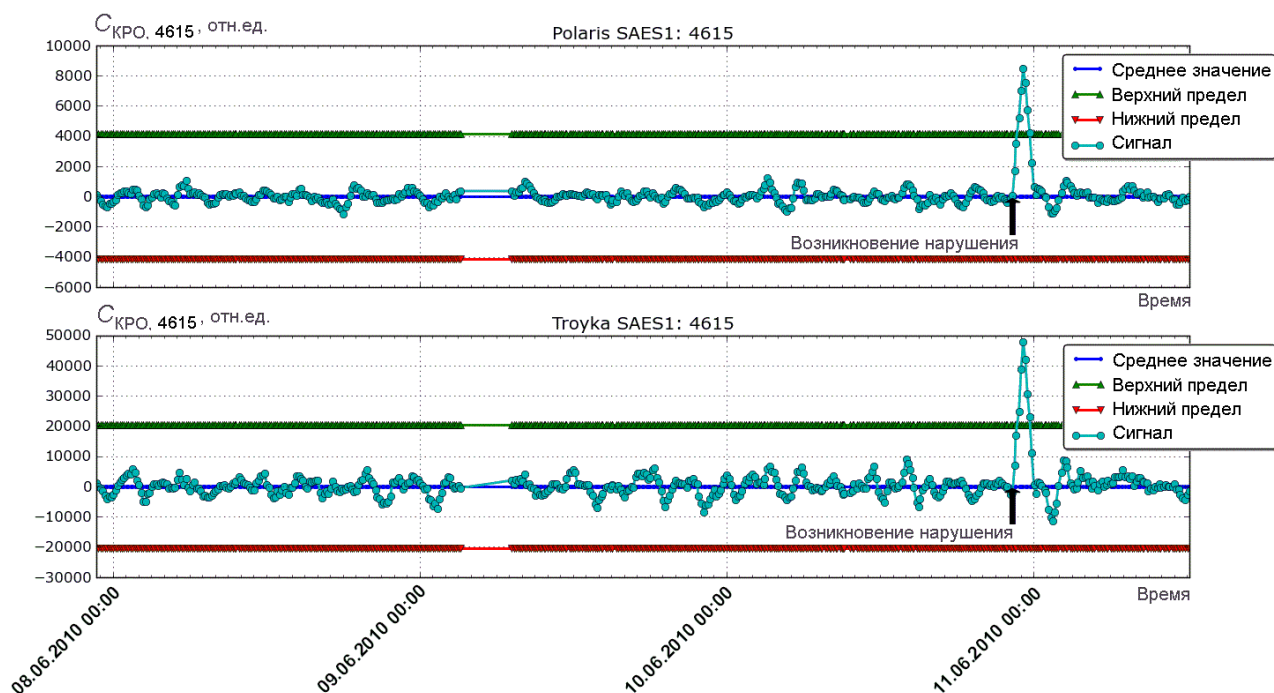


Рис. 7. Изменение во времени амплитуды диагностического сигнала, полученного с помощью программ POLARIS и ТРОЙКА, для САЭС-1 КРО 4615

начала возникновения нарушения не зафиксировано. На архиве данных был произведен поиск отказа. Результаты поиска и последующий анализ архивной информации подтвердили работоспособность предложенного диагностического алгоритма.

В моменты времени 01:55 09.11.2010 на (рис. 8) видно начало всплеска (отмечено черной стрелкой), соответствующее появлению в активной зоне нарушения, связанного с заливом гильзы КРО. В момент времени 02:05 09.11.2010 происходит выход сигнала за границы допустимого коридора безотказной работы. Отказ обнаружен. Время от появления отказа до его обнаружения составило 10 мин.

**Диагностика состояний 1-го энергоблока Курской АЭС.** Был проведен поиск нарушения, связанного с заливом КРО 3225 для 1 энергоблока Курской АЭС, зафиксированным 22 июля 2010 г. По данным архива в момент времени 07:40 произошло резкое увеличение расхода воды с 5,5 до 8,3 м<sup>3</sup>/ч в РК СУЗ 3225 (КРО). В моменты времени 07:44 19.07.2010 на (рис. 9) видно начало нарастания сигнала (отмечено черной стрелкой), соответствующее появлению в активной зоне нарушения, связанного с заливом

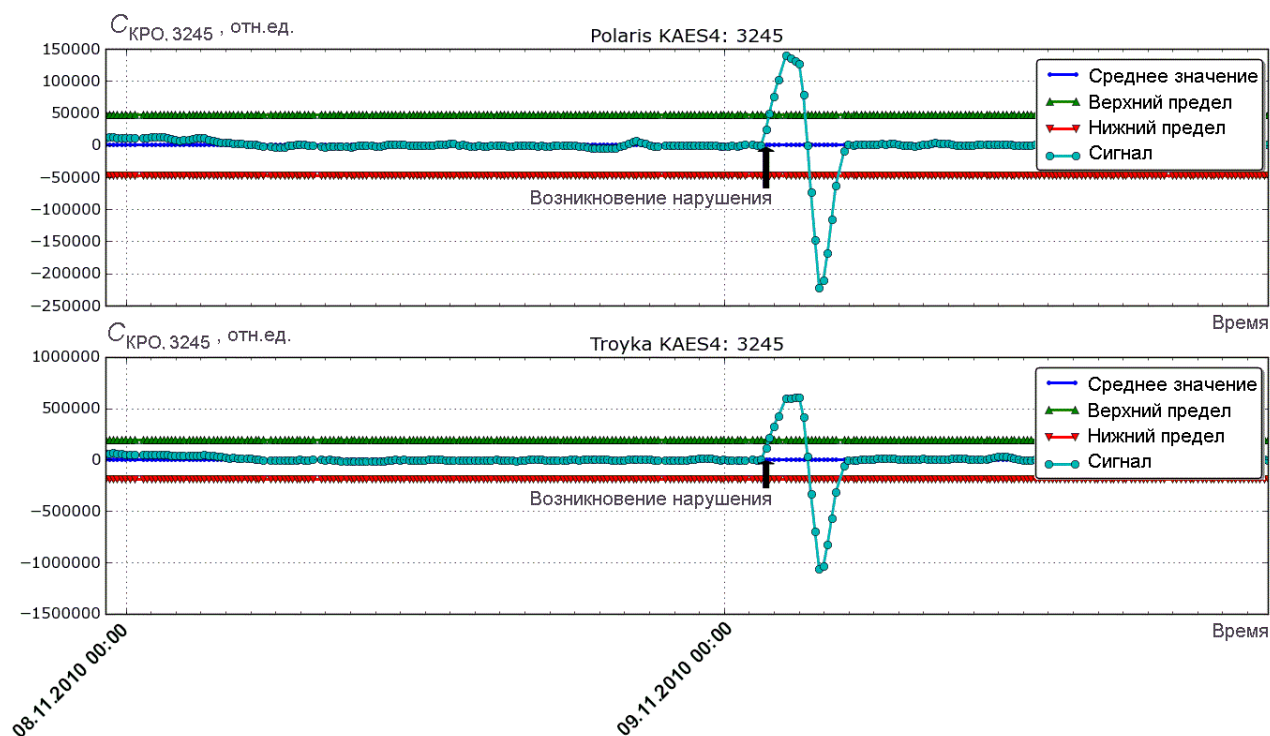


Рис. 8. Изменение во времени амплитуды диагностического сигнала, полученного с помощью программ POLARIS и ТРОЙКА, для КАЭС-4 КРО 3245.

гильзы КРО. В момент времени 08:14, происходит выход величины совпадения с шаблоном за границы допустимого коридора безотказной работы. Отказ обнаружен. Время от появления отказа до его обнаружения составило 30 мин.

## Состояние опытно-промышленной эксплуатации

В настоящее время системе **ESCRAN 3D** находится в опытно-промышленной эксплуатации на 3 блоке Курской и 1 блоке Смоленской АЭС. На Курской АЭС для диагностики КРО используется система **ESCRAN 3D** и программный модуль "Диагностика СУЗ".

Как показала практика опытно-промышленной эксплуатации системы **ESCRAN 3D**, в случае обнаружения возмущения, специалистам, работающим с системой, желательно иметь возможность углубленного анализа произошедшего события. Для этого требуется визуализация параметров РУ в виде графиков и картограмм.

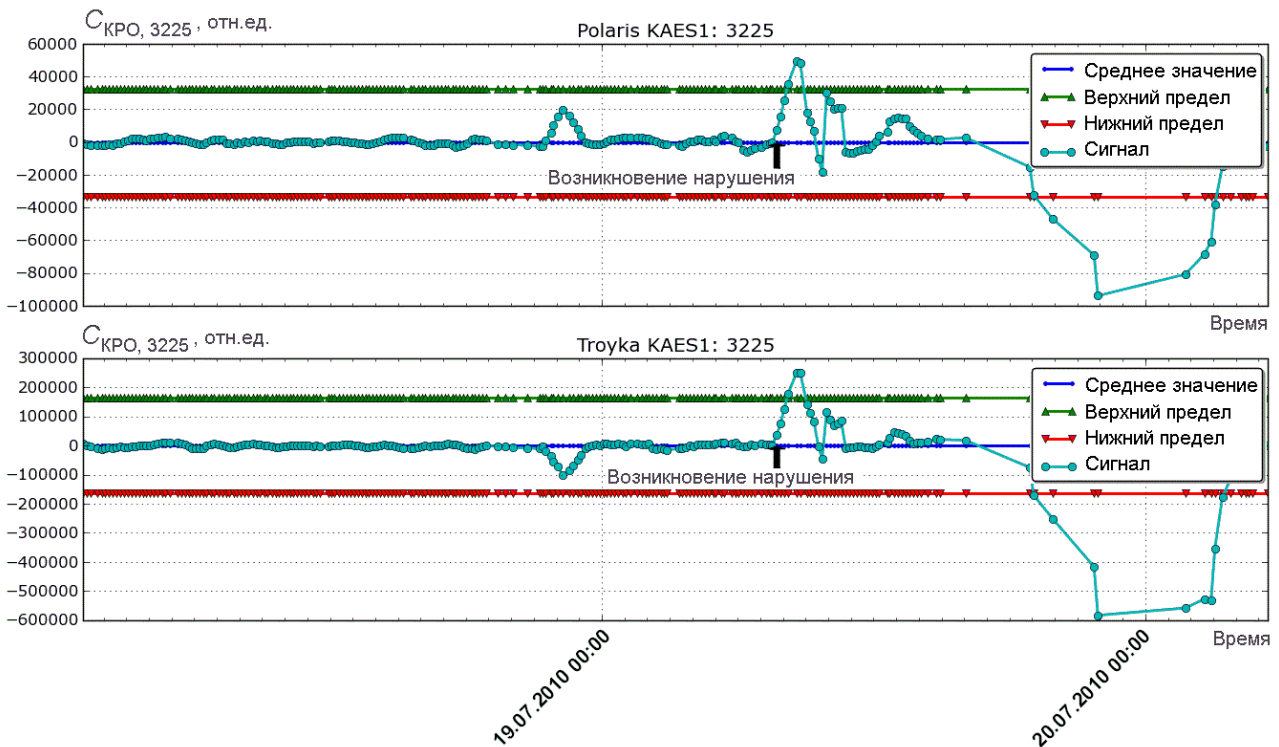


Рис. 9. Изменение во времени амплитуды диагностического сигнала, полученного с помощью программ POLARIS и ТРОЙКА, для КАЭС-1 КРО 3235.

В настоящее время ведутся работы по повышению чувствительности системы **ЕСРАН 3D** к случаям выхода из строя расходомеров и неверной регистрации положений ЗРК. Как показали результаты предварительных исследований, для качественной диагностики теплогидравлических параметров одного только нейтронно-физического расчета оказывается недостаточно и требуется привлечение теплогидравлических моделей, аналогичных используемым в программах ДИАГИДРА, ГИДРА, КОНТУР-М.

После устранения замечаний, полученных в ходе опытно-промышленной эксплуатации, планируется установка системы **ЕСРАН 3D** на других блоках Курской и Смоленской АЭС.

## Основные выводы

1. Создана расчетно-измерительная система **ЕСРАН 3D**, предназначенная для диагностики состояния активной зоны и эксплуатационной баз данных. Разработаны новые алгоритмы диагностики состояния активной зо-

ны и эксплуатационной базы данных РУ, использующие трехмерные программы поддержки и сопровождения эксплуатации, и обладающие повышенной чувствительностью. В системе **ECRAN 3D** реализован новый подход к идентификации нарушений на основе трехмерных шаблонов отказов, а так же применены новые подходы к повышению скорости работы диагностических алгоритмов, основанные на пространственной локализации возмущения.

2. Обеспечен требуемый уровень функционально-технических показателей системы диагностики с точки зрения эксплуатации ЯЭУ.

3. Проведены верификация и валидация созданного программного средства.

4. Система **ECRAN 3D** введена в опытную эксплуатацию на Курской и Смоленской АЭС.

5. Показано, что методический подход и большинство реализующих его алгоритмов являются общими для всех основных типов реакторов, хотя развитие и апробация методик и алгоритмов оперативной диагностики проводилось в процессе реализации поставленной задачи применительно к реакторам РБМК.

## Публикации автора по теме диссертации

1. *Д.А.Соловьев, Н.В.Щукин, А.А.Семенов, А.Л.Черезов, О.В.Глазков, Ф.В.Груздов, С.Г.Долженко, И.А.Чернышева, М.Б.Шарифьянов.* Система пространственно-временной диагностики состояния активной зоны ECRAN 3D. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 2012. — Том 4. — С. 68–77.
2. *Д.А.Соловьев, А.А.Семенов, Н.В.Щукин, В.А.Гриненко, Ф.В.Груздов, Ф.В.Милюков.* Выбор порога чувствительности для систем диагностики. // Спецтехника и связь, 2012. — Том 1. — С. 35–38.
3. *Д.А.Соловьев, А.А.Семенов, Н.В.Щукин.* Проблемы оптимального управления ядерными реакторами. // Ядерные измерительно-информационные технологии, Publishing House Technologies, 2010. — Том 1(33). — С. 4–10.



4. *Д.А.Соловьев, А.А.Семенов, Н.В.Шукин.* Система пространственно-временной диагностики ECRAN 3D. // Научная сессия НИЯУ МИФИ, 2012. — Том 1. — С. 60.
5. *Ф.В.Груздов, Д.А.Соловьев.* Построение эмпирической модели определения расхода теплоносителя через канал РБМК. // Научная сессия НИЯУ МИФИ, 2012. — Том 1. — С. 65.
6. *О.В.Глазков, Д.А.Соловьев.* Выявление отказов в положении ОР СУЗ в РБМК. // Научная сессия НИЯУ МИФИ, 2012. — Том 1. — С. 70.
7. *Ф.В.Миллюков, Д.А.Соловьев.* Выявление неверных перегрузок в реакторе РБМК. // Научная сессия НИЯУ МИФИ, 2012. — Том 1. — С. 72.
8. *Ф.В.Миллюков, Н.В.Шукин, А.А.Семёнов, Д.А.Соловьев, А.Л.Черезов.* Программа взаимокорреляционного анализа параметров ядерной безопасности. // Научная сессия НИЯУ МИФИ, 2011. — Том 1. — С. 62.